

Energibesparelser og CO2 reduktion på S-banen gennem tekniske, trafikale og adfærdsmæssige løsninger

22. juli 2009

Af Niels Helmø, akademiingeniør, DSB Miljø

Indhold:

Resumé	2
Energimåling og analyse	2
Miniunivers	3
Det globale univers.....	5
Energiregnskab.....	6
Regenereret energi.....	7
Konklusioner	7
Ideer til energibesparelser	7
Regularitet og adfærd	8
Regularitet	8
Energirigtig kørsel.....	10
Parkerede tog på depoter	11
Materielanvendelse.....	12
Indeklima.....	13
Energiforbrug	13
Udetemperaturens betydning.....	13
Behovsstyring.....	14
Kørestrøm.....	14
Facts om S-banen	16
Infrastruktur.....	16
Tog	16
Køreplan.....	16
Energiforbrug	16
Referencer	16

Resumé

DSB S-tog sparer 40 % energi ved at regenerere energien under bremsning. Ud over denne egenskab og en række andre tekniske løsninger er energiforbruget bestemt af trafikale-, kunde- og adfærdsmæssige forhold, som det er muligt at påvirke.

For at reducere udledningen af CO₂ har DSB indkøbt kørestrøm produceret af vind- og vandkraft.

DSB måler time for time energiforbruget på samtlige s-tog. På grundlag heraf er det muligt at følge udviklingen i forbruget og analysere mulighederne for energibesparelser. Ud fra målinger i hele 2008 kan det fastslås, at der spares 40 % energi fordi togene regenererer under bremsning. Med et årligt forbrug på ca. 120 GWh svarer det til en besparelse på ca. 50 GWh om året.

Ved at sammenholde energiforbruget med den opnåede regularitet, kan det konstateres, at man ved at forbedre regulariteten, ud over at vinde i kundetilfredshed, også sparer energi. Man opnår altså en helt kontant fordel ved at gøre en indsats for togenes rettidighed.

En betydende faktor for energiforbruget er køreplanen og hvordan den enkelte lokomotivfører fylder den ud. På grundlag af målinger i praksis på bestemte strækninger, og ved sammenligning af kørsel ved god og dårlig regularitet, kan det konstateres, at der kan være 20 - 40 % forskel på energiforbruget til traktion afhængig af køremåden.

DSB har ved information og kampagner gjort en stor indsat for at hjælpe lokomotivførerne til at køre energiøkonomisk. Efter et års målinger tyder det på, at der er opnået en samlet besparelse på ca. 4 % svarende til ca. 2,5 mio.kr. om året.

På tilsvarende måde er det vigtigt hvordan togene parkeres når de ikke er i drift og hvordan de betjenes under rengøring. Her spiller vaner, ressourcer og arbejdsrutiner en stor rolle.

En anden vigtig faktor for energiforbruget er spørgsmålet om hvordan man tilpasser indsættelse af materieltyperne til køreplan og passagerbehov.

En væsentlig men undertiden overset post på energiregnskabet er den betydelige mængde energi, der går til at opretholde passagerernes komfort. F.eks. udgør forbruget til varme ca. 20 % af det samlede årlige forbrug. Dimensionering og styring af indeklimaet i forhold til behov og passagermængde er et indsatsområde DSB fremover vil sætte fokus på.

Ved at vælge at indkøbe kørestrøm produceret af vind- og vandkraft – RECS beviser – har DSB nedsat udledningen af CO₂ herfra til nul.

Energimåling og analyse

For at finde energibesparelser har DSB gennemført et omfattende analysearbejde af energiflow og tab i den Københavnske S-bane omfattende såvel tog som infrastruktur.

Arbejdet har givet anledning til en række ideer til energibesparelser, som er analyseret eller er ved at blive det. Nogle af ideerne vil blive implementeret og for andre har det vist sig, at de pt. ikke er økonomisk bæredygtige.

Analyserne er gennemført i to faser:

Første fase omfattede et "miniunivers" omfattende kørsler to netter på en afgrænset strækning med kun to tog. Formålet med analysen var at opnå forståelse af den gensidige påvirkning mellem de enkelte tog.

Anden fase omfattede det "globale univers" omfattende hele 2008, hele S-banen og samtlige tog. Formålet med analysen var at opnå forståelse af det samlede systems energiflow.

Miniunivers

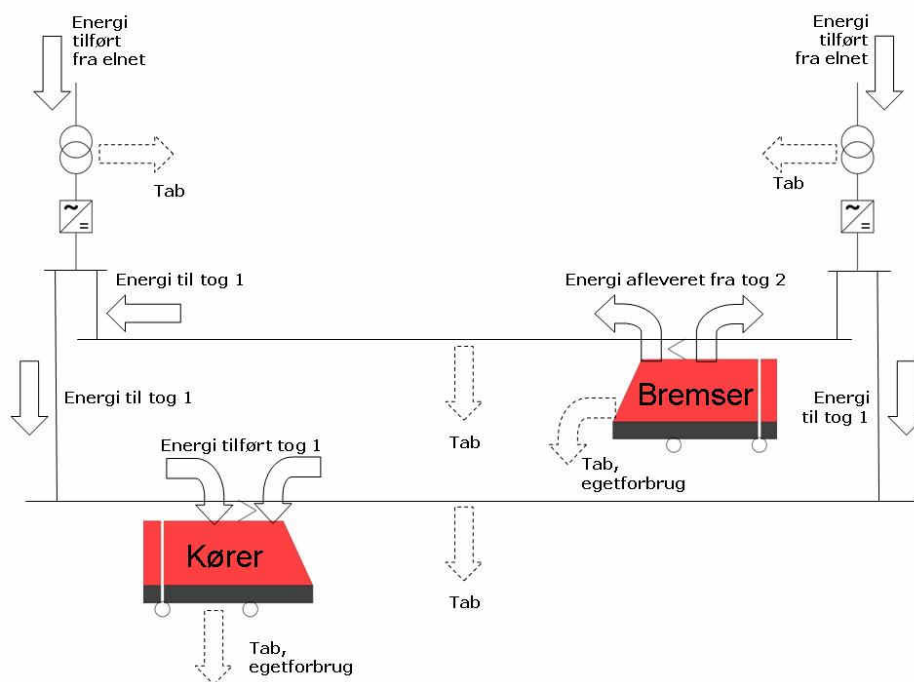
På en strækning mellem to naboomformerstationer blev der om natten gennemført et antal prøvekørsler med to s-tog.

Selv om forsøget var begrænset, var målingerne alligevel ganske omfattende, idet der var 10 målesteder, hvor der hvert sted blev foretaget 5 målinger. Målingerne blev foretaget digitalt hvert sekund, hvilket gav 3.000 måleværdier pr. minut.

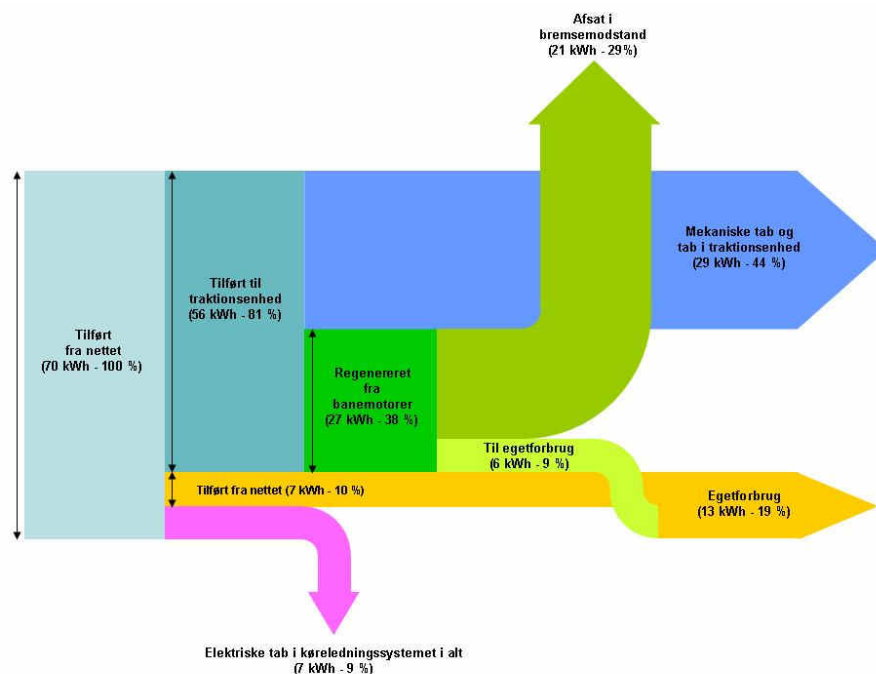
En så omfattende måling kan ikke undgå at give anledning til usikkerhed og fejl, som nøje måtte overvejes og analyseres. Ud over selve måleudstyrets nøjagtighed var der tale om digitaliseringsfejl og samplingsfejl foruden helt banale huller i data. Endvidere måtte målingernes følsomhed over for overtoner i jævnstrømmen overvejes.

På grundlag af analyse af fejlkilderne blev et antal målesekvenser udvalgt til nærmere energianalyse.

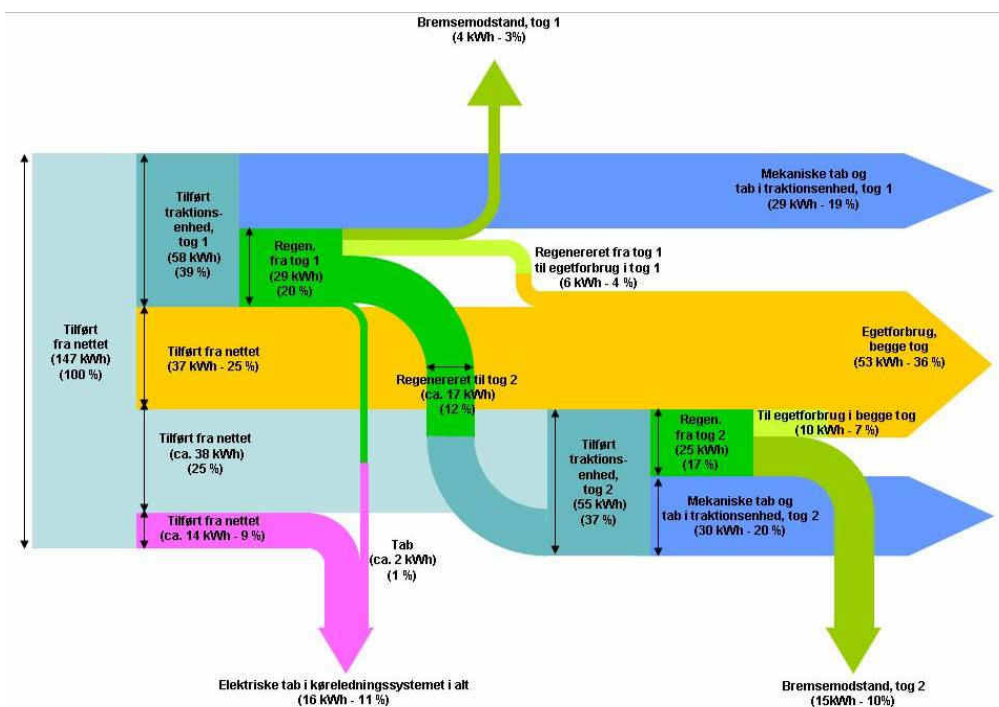
Kørslerne blev gennemført med forskellige kombinationer af ét og to tog som hhv. accelererede og bremsede. Idet køreledningsanlægget var helt afbrudt fra omverdenen kunne energien kun omsættes mellem de to tog. Nedenstående figur viser princippet for målingerne.



Ved kørsel med et tog alene målt et energiflow som vist på nedenstående figur. Det ses, at tabet i kørestrømssystemet - køreledning og omformerstationer - er ca. 9%. Ca. 38% af den energi der tilføres fra køreledningsnettet omsættes til regenereret energi, hvoraf det meste brændes af i togets bremsemodstand, fordi der ikke er andre tog til at aftage energien. Noget af den regenererede energi går dog til at dække ca. halvdelen af togets eget forbrug. Resten af energien afsættes til mekaniske tab, tab i traktionsenheden og i de mekaniske bremser.



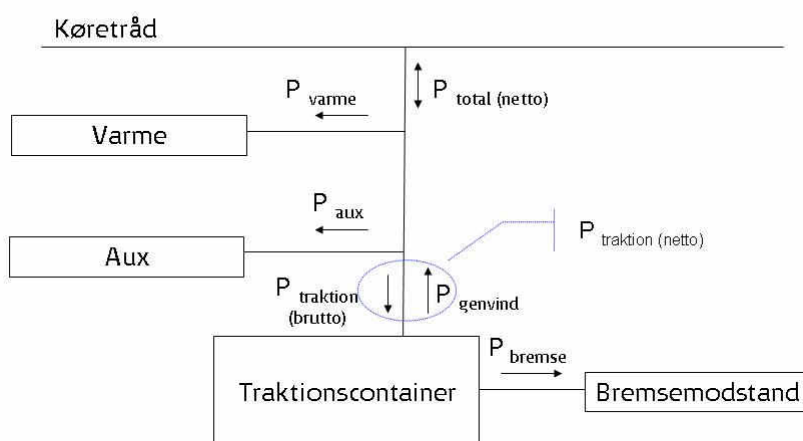
Ved kørsel med to tog som skiftevis accelererer og bremser fås et anderledes kompliceret billede. På nedenstående figur starter tog 1 først. Når tog 1 bremser accelererer tog 2, som kører til enden og bremser. Det ses, at den energi der brændes af i tog 1's bremsemodstand nu er ganske lille fordi en stor del kan optages af tog 2.



Det globale univers

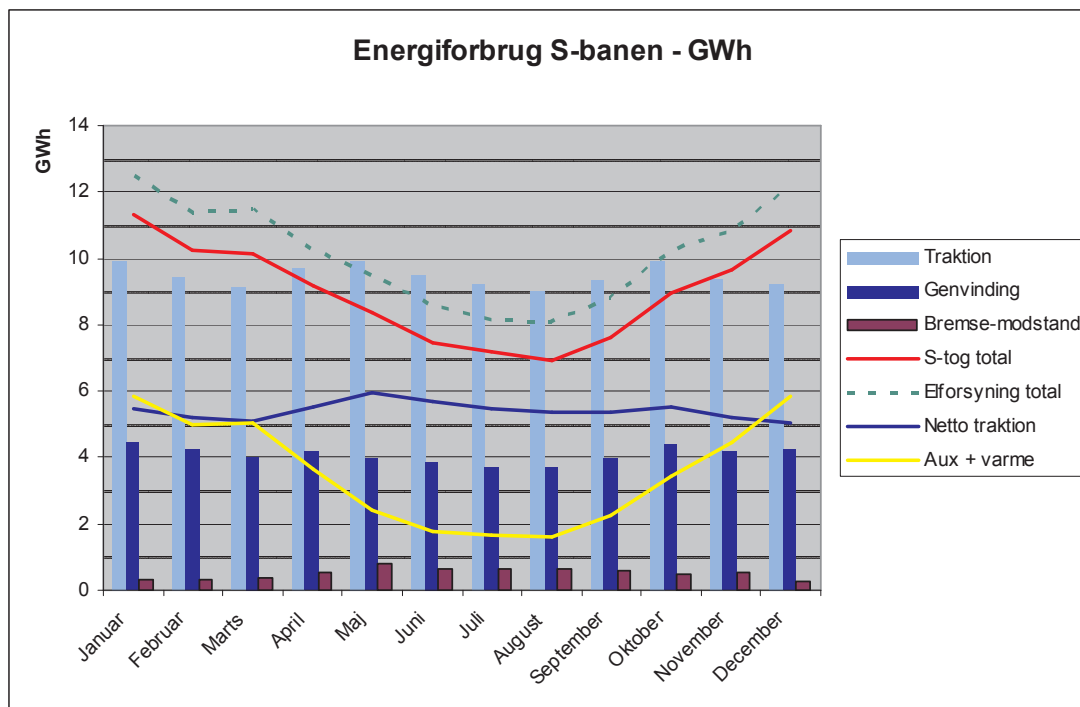
S-banen udgøres af i alt ca. 170 km dobbeltspor som er elektrisk sammenhængende. Strømforsyningen sker fra i alt 39 omformerstationer og der kører i alt 135 togsæt. Da alle omformerstationer og samtlige togsæt er udstyret med energimålere er det muligt at opstille et samlet billede over energiforbruget på S-banen.

I s-togene måles energien som vist på følgende figur.



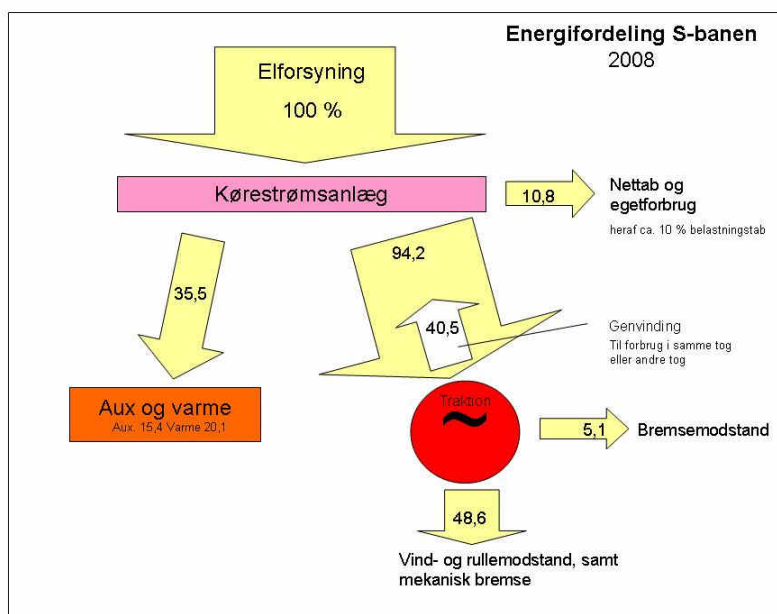
Registrering af energiforbrug i S-tog

Forbruget over året er vist måned for måned på nedenstående figur. Det ses, at forbruget til hjælpkraft (aux) og varme naturligvis falder om sommeren. Samtidig stiger den andel af den regenererede energi, der brændes af i togets bremsemodstand i stedet for at blive genvundet, fordi den ikke kan afsættes til varme i togene.



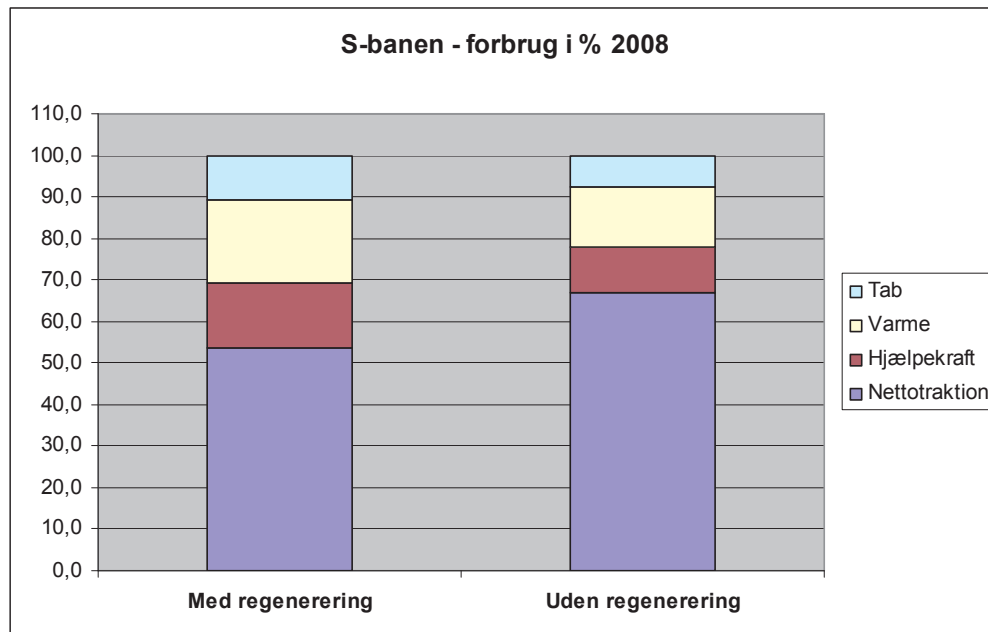
Energiregnskab

Det samlede energiregnskab for 2008 kommer herefter til at se ud som på nedenstående figur. Det ses, at nettabene udgør ca. 11 % af den samlede tilførte energi. Heraf er ca. 10 % belastningstab og resten er tomgangstab og egetforbrug i omformerstationerne.



Regenereret energi

Det ses, at en meget væsentlig del af bremseenergien regenereres og føres tilbage i køreledningen. Der kan opstilles følgende billede med og uden regenerering.



Konklusioner

De væsentligste konklusioner på analyserne er:

- Hele ca. 40 % af den tilførte energi regenereres og nyttiggøres igen.
- Den regenerative bremsning giver altid energibesparelser, også når toget kører alene.
- Kun ca. 5 % energi brændes af i togets bremsemodstand.
- Tabet i kørestrømssystemet - køreledning og omformere - er ca. 10 % under kørsel (belastningstab).

Ideer til energibesparelser

Under analysearbejdet opstod der forskellige ideer til energibesparelser, som efterfølgende er analyseret (tallet i parentes henviser til efterfølgende note).

Følgende er eller vil blive gennemført:

- Ingen varme under togets acceleration. (1)
- Angivelse af energioptimal køremåde, som hjælp for lokomotivførerne. (2)
- Udskiftning af halogenspots i kupeerne med LED lyskilder. (2)

Følgende vil blive nærmere undersøgt:

- Tomgangstab i omformerstationer. (3)
- Egetforbrug i omformerstationer. (4)

Følgende ideer er undersøgt men er pt. ikke rentable:

- Forøgelse af køreledningernes elektriske tværsnit. (1)

- Parallelkobling af dobbeltsporets to køreledninger. (1)
- Energooptimal udkobling af omformerstationer om natten. (3)

- (1) Reduktion af belastningstab.
- (2) Reduktion af energiforbrug.
- (3) Reduktion af tomgangstab.
- (4) Reduktion af egetforbrug.

Herudover er det undersøgt, om det vil være muligt at nyttiggøre en del af den energi, der brændes af i togets bremsemodstand. Nyttiggørelsen vil enten skulle ske ved opsamling af energien i toget eller i stationære anlæg langs banen (svinghjul, batterier eller superkondensatorer).

Opsamling i toget er desværre ikke mulig, pga. vægtbegrænsninger. Opsamling i stationære anlæg er undersøgt men er pt. ikke rentabelt.

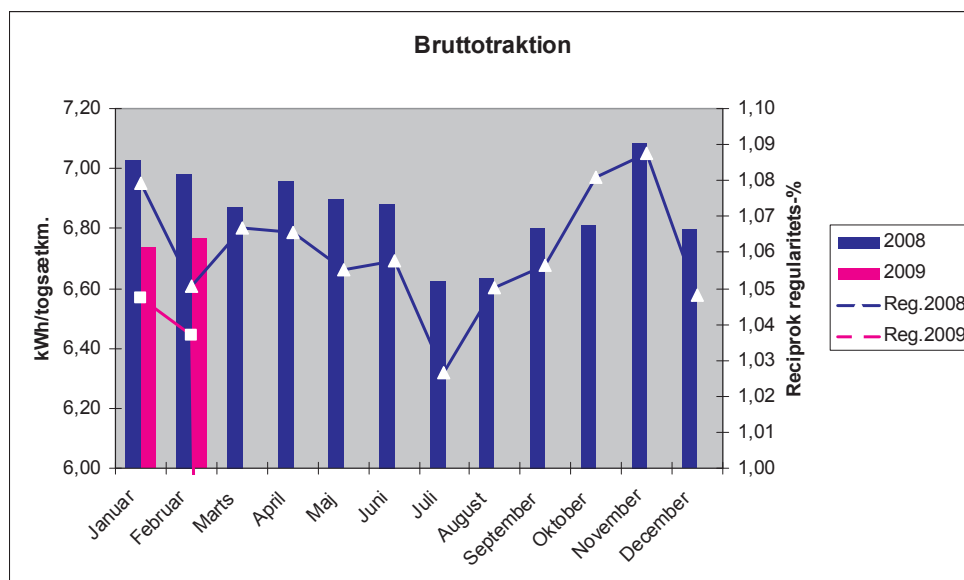
Regularitet og adfærd

Der er ingen tvivl om at køreplanens tilrettelæggelse og lokomotivførernes mulighed for og evne til at fylde den ud har betydning for energiforbruget. Der kan således eftervises en direkte sammenhæng mellem energiforbruget og regulariteten og energiforbruget og den enkelte lokomotivførers køremåde.

Regularitet

En uhensigtsmæssig kørsel vil betyde et forhøjet bruttoenergiforbrug til traktion. Ved at sammenligne energiforbruget for tog, som kører på samme linje men på forskellige dage, hvor der har været god hhv. dårlig regularitet, kan det konstateres, at energiforbruget til traktion på de dage med dårlig regularitet er 40-60 % højere end på dage med god regularitet.

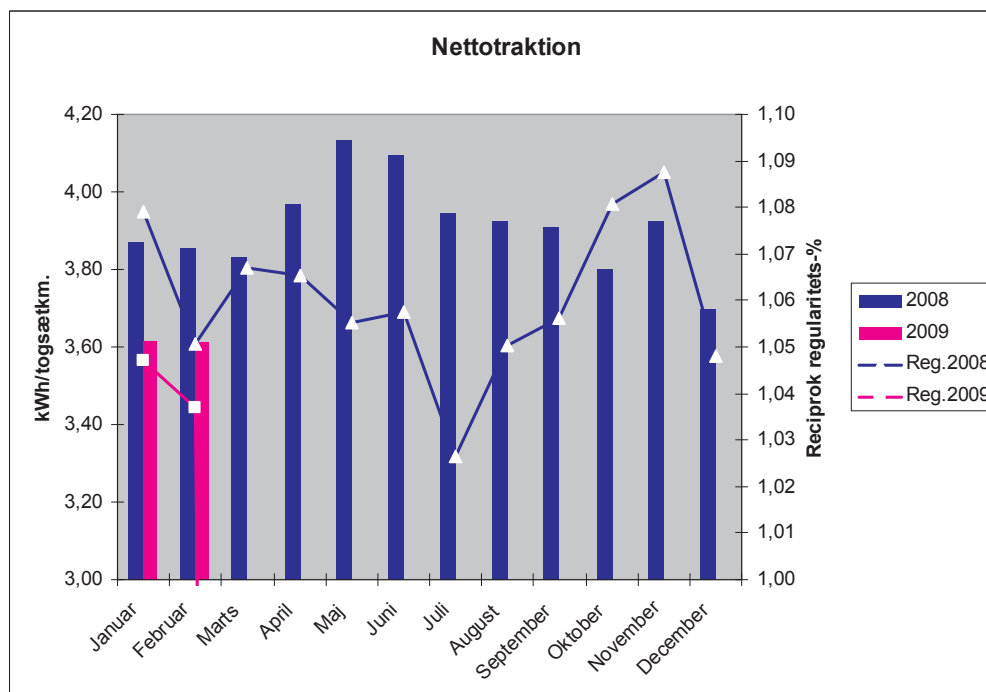
På nedenstående graf er bruttotraktionsenergien (søjler) pr. måned sammenholdt med regulariteten (kurver). Regulariteten opgøres normalt som den procentvise opfyldelse af 100 % rettidighed. For at lette illustrationen er traktionsenergien sammenholdt med det reciproke tal for regulariteten. Det betyder, at jo nærmere den reciproke værdi er ved 1, jo bedre er regulariteten.



Som det ses, er der en temmelig god overensstemmelse mellem energiforbrug og regulariteten.

Imidlertid vil køremåden ikke kun have indflydelse på den bruttoenergi som forbruges under acceleration men også på den energi der regenereres under bremsning. Da en del af denne nyttiggøres bør man ved betragtning af den samlede effekt af regulariteten se på nettotractionen (bruttotraction minus regenereret energi).

På nedenstående graf er nettotractionens energi sammenholdt med regulariteten.



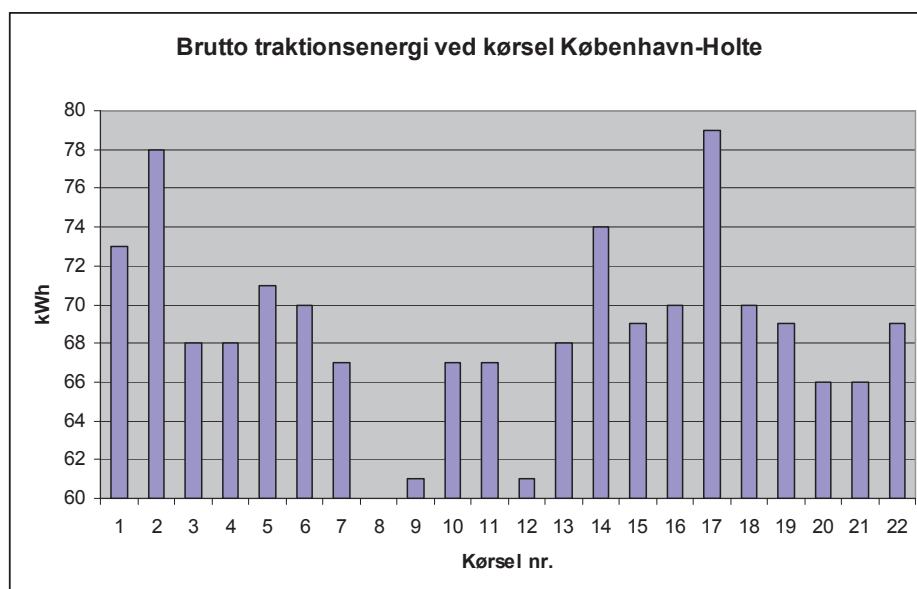
Der ses fortsat at være en vis sammenhæng om end den er noget mindre udpræget. Med andre ord "modvirker" den forøgede regenererede energi i nogen grad den negative virkning af den dårlige kørsel.

Konklusionen er altså, at der bruges lidt mere energi pr. tog ved dårlig regularitet. Det samlede energiforbrug vil imidlertid blive påvirket af, i hvilken grad der samtidig aflyses tog ved uregelmæssigheder i driften.

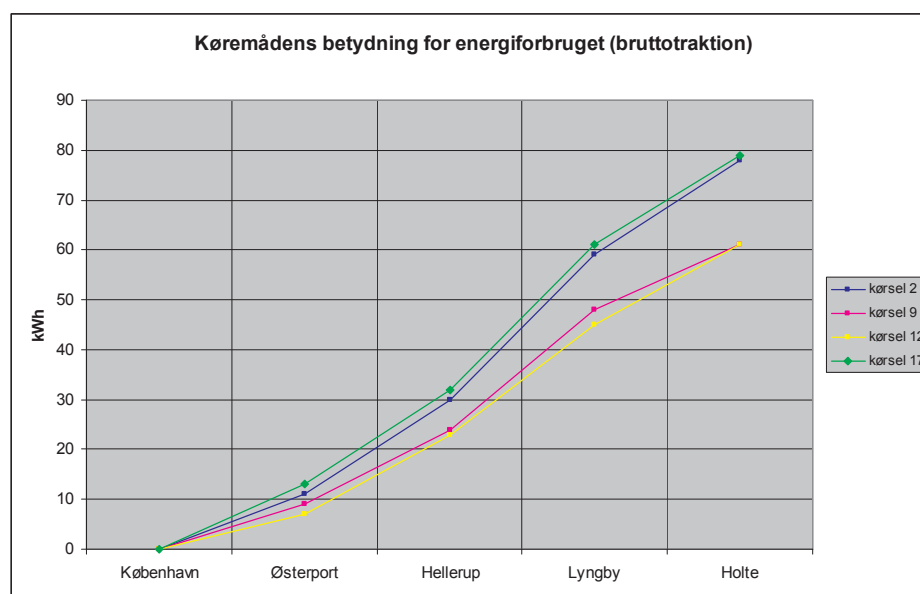
Energirigtig kørsel

På grundlag af måling af energiforbruget ved gennemkørsel af en bestemt linje flere gange, kan det konstateres, at der kan opnås væsentlige besparelser ved energirigtig kørsel.

Eksempelvis er der på strækningen mellem København og Holte gennemført 21 måling med kørsler efter normal køreplan (linje B). Målingerne viser at dårligste kørsel bruger ca. 30 % mere brutto traktionsenergi end den bedste kørsel.



Nedenfor vises energiforbruget delstrækning for delstrækning for bedste og dårligste kørsel.



DSB S-tog har gjort en stor indsats for at hjælpe lokomotivførerne til at køre energiøkonomisk. Og der kan efter det første års indsats konstateres en besparelse. Følgende er eller vil blive sat i værk:

- Informationskampagne for energirigtig kørsel.
- Automatisk visning i førerbordet af anbefalet hastighed.
- Visning af om der skal cruises (køres med konstant hastighed) eller coastes ("frihjul").

Pt. er DSB ved at overveje mulighederne for at anvende erfaringerne fra en kørselssimulator.

Parkerede tog på depoter

Når togene parkeres på depoterne er det vigtigt, at de afleveres på en sådan måde at energiforbruget er mindst muligt, men samtidig sådan at en laveste temperatur holdes af hensyn til det tekniske udstyr og sådan, at der er en fornuftig arbejdstemperatur under rengøring af toget.

Energiforbruget påvirkes i høj grad af adfærd, arbejdsrutiner og bemanning.

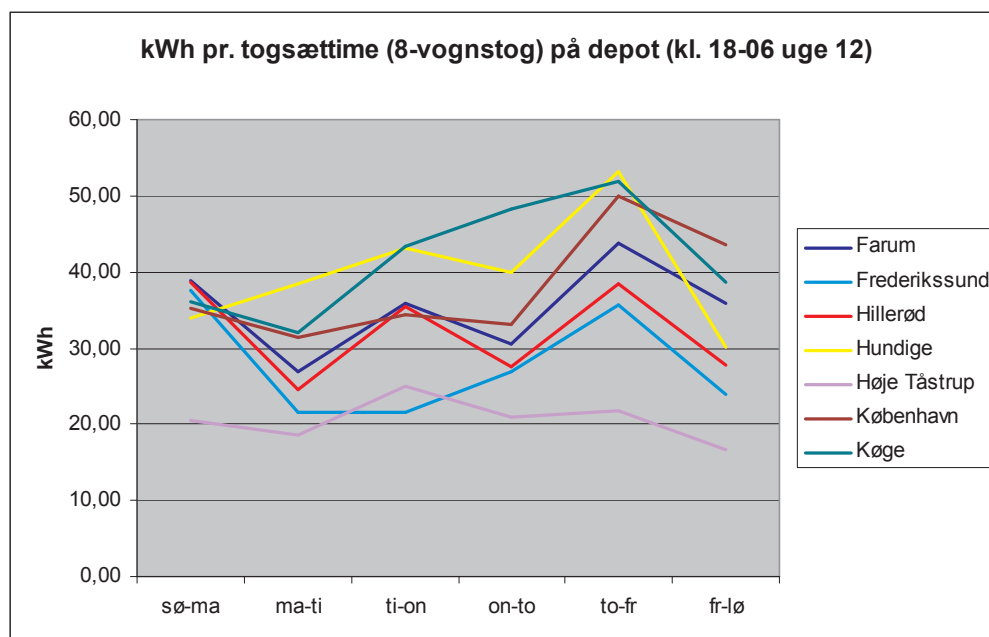
Adfærd bestemmes i høj grad af hvad der er nemmest (f.eks. klargøring af alle tog samtidigt uanset hvornår det skal køre om morgenen) og af hvad der er behageligt (f.eks. rengøring med varmen tændt) og kan påvirkes ved holdningsbearbejdning.

Arbejdsrutiner er bestemt af hvordan arbejdet tilrettelægges og vil i nogle situationer kunne ændres. F.eks. vil det bedste være, hvis der kan rengøres umiddelbart når toget afleveres fra drift og stadig er opvarmet. Rengøring mv. i flere arbejdsgange (affaldsindsamling, gulvvask, opsætning af reklameskilte) bør om muligt undgås af hensyn til energiforbruget.

Bemandingen af depoterne vil ofte være bestemmende for arbejdstilrettelæggelsen, og der vil meget sjældent være økonomi i at ændre på den.

Ved at sammenligne energiforbruget pr. togsæt pr. time for parkerede tog på de forskellige depoter, kan man få et indtryk af hvor hensigtsmæssigt parkering og rengøring foregår.

På nedenstående graf er vist det gennemsnitlige timeforbrug pr. dag for 8-vognstog i perioden fra kl. 18 til 06 næste morgen i en uge midt i marts måned.



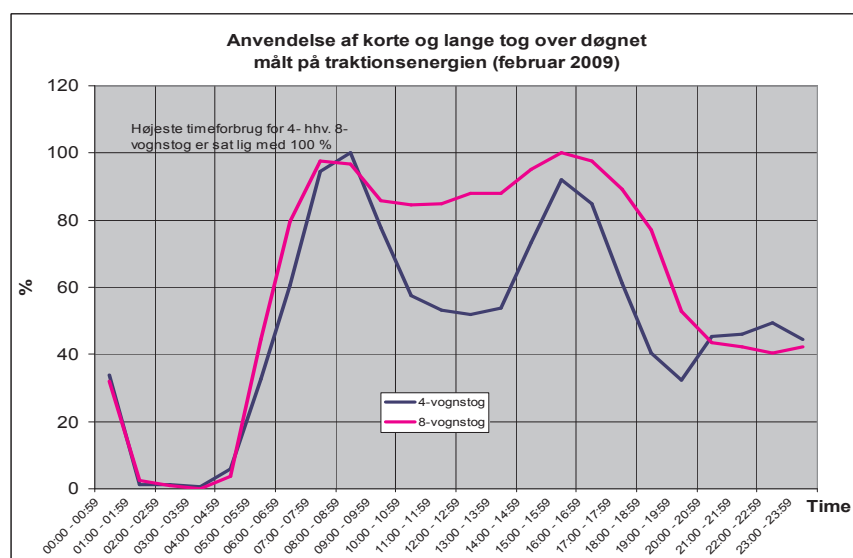
Det ses at der er en væsentlig forskel på de forskellige depoter. På depotet i Høje Tåstrup er forbruget lavt hvilket skyldes, at man der har muligheden for at rengøre toget umiddelbart når det ankommer.

Materielanvendelse

Det er vigtigt at indsættelse af materiellet tilpasses kapacitetsbehovet på det pågældende tidspunkt af døgnet. På S-banen findes 2 materieltyper - 4-vognstog og 8-vognstog - hvor den eneste principielle forskel består i passagerkapaciteten.

Ved at indsætte et kort tog i stedet for et langt opnås en energibesparelse på ca. 37 % pr. kørt togsætkm.

På grundlag af den forbrugte traktionsenergi kan anvendelsen af korte og lange togsæt over døgnet illustreres som vist nedenfor.



Det ses, at det især er anvendelsen af de korte tog der styres på i løbet af dagen. Kurven bør give anledning til, at det overvejes, om der uden for myldretimerne er den rigtige sammensætning af korte og lange togsæt i forhold til belægningsprocenten på samme tid.

Indeklima

Opretholdelse af indeklimaet sker ved ventilation, som kan stilles til friskluftindtag eller recirkulation samt ved opvarmning til en fastlagt temperatur på 19 gr.C. Der findes ingen klimaanlæg med køling i s-tog.

Energiforbrug

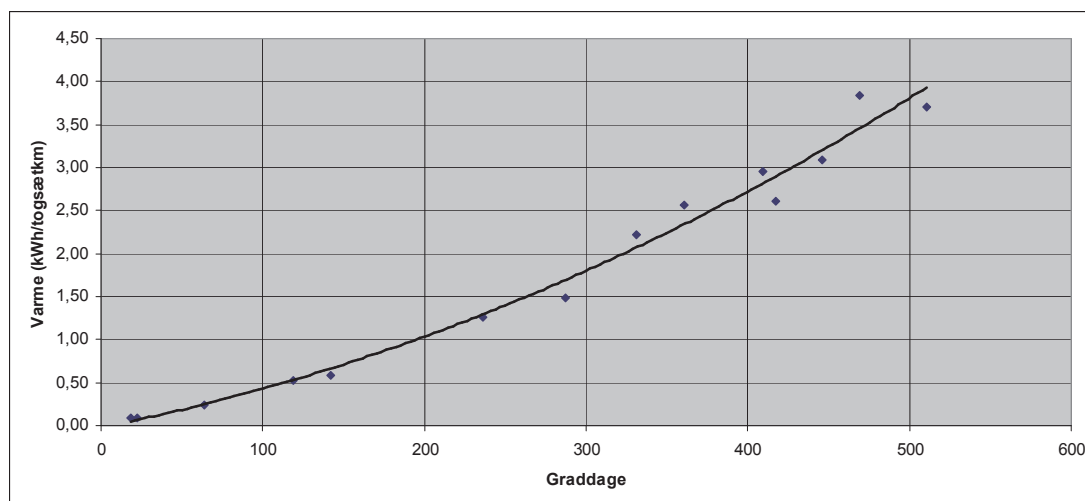
Forbruget til hjælpkraft og varme udgør i alt 35,5 % af det samlede årlige energiforbrug, hvoraf varmen udgør de 20,1 %. En del af hjælpkraften går til ventilation i passagerkupeerne således at det samlede forbrug til passagerkomfort er noget højere end de 20 %.

Det skal bemærkes, at der i sagens natur kun er varme om vinteren, hvorfor den procentvise andel af forbruget på dette tidspunkt er højere. Således udgjorde varmeforbruget i december 2008 eksempelvis ca. 35 % af det samlede forbrug i december.

Til gengæld varierer energiforbruget til hjælpkraft kun lidt hen over året, hvilke skyldes, at togets basale funktioner er de samme uafhængig af årstiden, og at ventilationen kører både sommer og vinter af hensyn til luftskiftet og for at undgå kondens.

Udetemperaturens betydning

Der er en klar sammenhæng mellem udetemperaturen og energiforbruget til opvarmning i toget, hvilket fremgår af følgende graf.



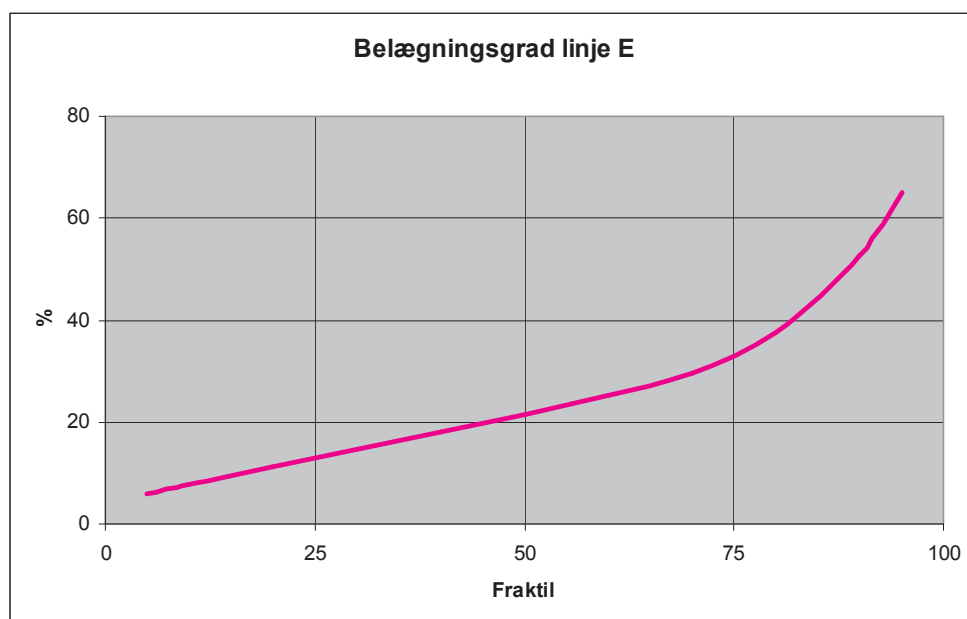
På grundlag af denne sammenhæng kan det beregnes, at man ved at sænke varmen i toget med én grad vil spare 10-14 % på varmeforbruget. Besparelsen vil også kunne opnås hvis den indblæste ventilationslufts temperatur øges med én grad via en varmeveksler.

Man kan overveje, om der altid skal opretholdes samme temperatur i toget uanset udetemperaturen set i lyset af, at rejsens gennemsnitlige varighed på S-banen er 12 minutter, og at passagererne normalt beholder overtøjet på under rejsen - vel at mærke overtøj, som er afpasset de udendørs forhold.

Behovsstyring

Som det ses udgør energiforbruget til at opretholde et ordentligt indeklima en væsentlig post. Når man sammenholder energiforbruget med antallet af passagerer i togene synes der at være basis for en bedre dimensionering og styring af indeklimaet i forhold til behov og passagermængde.

Nedenstående graf viser eksempelvis belægningen opgjort over et døgn på en bestemt linje.



Følgende muligheder for at behovsstyre energiforbruget vil blive overvejet:

- Styring af indetemperatur i forhold til udetemperatur.
- Styring af ventilationen i forhold til antallet af passagerer og udetemperaturen.
- Styring af ventilation i forhold til CO2 indhold.

Kørestrøm

Kørestrøm til S-banen og fjernbanen leveres fra et antal omformerstationer og fordelingsstationer. Kørestrøm udbydes og indkøbes af Banedanmark, som videresælger elektriciteten til togoperatørerne herunder DSB.

For at gøre en forskel for klimaet og yderligere underbygge jernbanens miljøfordele har DSB valgt at indkøbe grøn strøm produceret af vind- og vandkraft. Indkøbet er effektueret ved indkøb af RECS beviser (Renewable Energy Certificate System) i overensstemmelse med gældende EU direktiver. Beviserne sikrer, at den solgte energi stammer fra vedvarende energi.

DSB's samlede forbrug af kørestrøm var i 2008 på 241 GWh. Heraf brugtes ca. 121 GWh på S-banen.

Ved at bruge grøn strøm sparer S-banen naturen for en udledning på ca. 50 mio. ton CO₂.

Facts om S-banen

Infrastruktur

Km spor:	ca. 170 km dobbeltspor
Afstand mellem togstationer:	fra ca. 1 km til ca. 8 km
Antal omformerstationer:	39 stk.
Afstand mellem omformerstationer:	ca. 4,2 km i gennemsnit (fra 2 til 7 km)
Nominel spænding:	1650 V DC

Tog

Antal togsæt:	135 stk. heraf 31 stk. 4-vognstog og 104 stk. 8-vognstog.
Max. strøm pr. togsæt:	2.500 amp.
Togvægt:	125 t (8-vognstog)
Antal pladser:	336 pladser (8-vognstog)
Max. hastighed:	120 km/h

Køreplan

Togtæthed/frekvens:	på de centrale strækninger 2 min. på yderstrækningerne 10 min.
---------------------	---

Energiforbrug

Samlet afregnet forbrug (1 GWh = 1.000.000 kWh)	ca. 121 GWh i 2008
--	--------------------

Referencer

Analyse af tab på S-banen, oktober 2007.

af Niels Helmø, Banedanmark, Ole Klammer, DSB, Rikke Næraa, DSB, Torben Rahbek, rådgiver, Thomas Sjøgren, DSB.

Analyse af tab på S-banen, oktober 2007. Sammenfattende rapport.

af Niels Helmø, Banedanmark, Ole Klammer, DSB, Rikke Næraa, DSB, Torben Rahbek, rådgiver, Thomas Sjøgren, DSB.

Reduktion af de elektriske tab på S-banen, juni 2008. Analyse af besparelspotentialet.

af Niels Helmø, Banedanmark, Rikke Næraa, DSB, Torben Rahbek, rådgiver, Thomas Sjøgren, DSB.